

¹Е. В. Овчинников, д-р техн. наук, проф., ²А. А. Котик

¹Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: ovchin@grsu.by

²ОАО «Автобусный парк г. Гродно», Беларусь

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

В статье представлены результаты исследований структуры, морфологии и физико-химических характеристик нанокompозиционных покрытий, полученных по аддитивным технологиям путем совмещения методов электродуговой наплавки и электроискрового легирования. Показано, что химический состав покрытий оказывает существенное влияние на прочностные, триботехнические свойства. Наблюдается возможность формирования МАХ-фаз в исследуемых покрытиях. Установлено изменение зависимости значений удельной поверхностной энергии от состава покрытия и технологических режимов формирования. Для всех исследуемых типов покрытий наблюдается образование нанодисперсных систем в структуре покрытия. Применение данного технологического подхода приводит к улучшению физико-механических характеристик модифицируемых стальных субстратов. Установлено, что формирование на поверхности покрытия аддитивных покрытий с оптимальными триботехническими характеристиками.

Ключевые слова: дуговой разряд, электроискровое легирование, покрытия, триботехнические свойства, твердость.

Y. Auchenikau, A. A. Kotik

ADDITIVE TECHNOLOGIES TO INCREASE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AUTOMOBILE UNITS

The article presents the results of studies of the structure, morphology, and physicochemical characteristics of nanocomposite coatings obtained by additive technologies by combining the methods of electric arc surfacing and electrospark alloying. It is shown that the chemical composition of the coatings has a significant effect on the strength and tribological properties. The possibility of the formation of MAX phases in the studied coatings is observed. A change in the dependence of the values of the specific surface energy on the composition of the coating and technological modes of formation has been established. For all the studied types of coatings, the formation of nanodispersed systems in the structure of the coating is observed. The use of this technological approach leads to an improvement in the physical and mechanical characteristics of the modified steel substrates. It has been established that the formation of additive coatings with optimal tribological characteristics on the coating surface.

Keywords: arc discharge, electrospark alloying, coatings, tribological properties, hardness.

Введение. Применение различных электрофизических методов повышения эксплуатационных характеристик изделий, деталей машин и механизмов, в том числе применяемых в автомобильной промышленности являются достаточно распространёнными технологиями. Так метод электродуговой наплавки позволяет восстанавливать различные конструкционные изделия двигателей автомобиля, в частности коленчатые и распределительные валы, шестерни и т.п. Данная технология позволяет существенно снизить себестоимость проводимого ремонта различных узлов автотракторной техники. Наплавка - это процесс восстановления изношенных деталей машин. Поверхность детали, поврежденной в процессе эксплуатации, покрывается слоем нового материала. Материал подается на поверхность изделия в расплавленном виде. При наплавке основной материал частично плавится, поэтому образуется переходная зона, в которой наплавляемый материал перемешивается с материалом изделия. Процентное содержание материала основы в данной зоне может составлять до 60%, более высокая концен-

трация нежелательна, так как может приводить к снижению значений физико-механических характеристик наплавляемого материала. Существует несколько способов наплавки: газовая наплавка, дуговая наплавка, наплавка под флюсом, электрошлаковая наплавка, дуговая наплавка с вольфрамовым электродом в защитной атмосфере инертного газа, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом с присадочным прутком (GTA), газовая дуговая сварка металлическим электродом (GMA), наплавка с использованием самозащитных порошковых проволок (SSA), плазменная наплавка (PTA), лазерная наплавка и другие методы [3–5]. В ходе проведенных исследований применялись методы аргонодуговой сварки с неплавящимся электродом и присадочным прутком, в защитной газовой среде, дуговой наплавке. В методах связанных с напылением в защитной или инертной газовой среде наплавляемый материал доставляется к подложке материалу в газовой среде. Плавление проволоки происходит за счет электрической дуги, действующей между двумя электродами. Один из них является материалом основ, а проволока является – вторым электродом. Проволока подается системой подачи через сопло манипулятора в газовой среде. Газ используется для отделения расплавленного материала от внешней среды [6]. В ходе нанесения покрытия образуется сварочная ванна, которая частично внедряется в материал субстрата, а также образует наплавленный слой различной толщины в зависимости от условий проведения процесса наплавки. Механизм интенсивного перемешивания материала основы и наплавляемого материала является нежелательным процессом, так как существенно сказывается физико-механических характеристиках наплавочного материала приводя к образованию различного типа эвтектических фаз, свойства которых гораздо ниже чем у материалов применяемых в процессе наплавки. Качество наплавочного материала, также зависит от скорости его кристаллизации - как правило, чем быстрее происходит кристаллизация, тем выше качество наплавочного шва. Эти процессы зависят от скорости движения манипулятора, мощности дуги и способности системы отводить тепло в процессе наплавки. С экономической точки зрения характер, движение наплавочного манипулятора должно быть, как можно быстрее, но это требует увеличения мощности электрической дуги. Однако это может привести к чрезмерному нанесению наплавочного материала и перегрева материала подложки, что приводит к отпуску модифицируемого материала или полному его повреждению, что зависит от условий теплопередачи системы [2]. Данные технологические подходы позволяют получить восстановленный материал, по своим свойствам не превосходящий базовый. Для придания дополнительных физико-механических характеристик наплавленным материалам возможно использование других электро-физических методов, формирования покрытий. В частности в данном случае подходит технология электроискрового легирования (ЭИЛ). Электроискровое легирование - стандартная технология модифицирования проводящих поверхностей твердых тел, которая характеризуется высокой плотностью энергии и низким тепловыделением в процессе нанесения покрытия. Данный метод нашел широкое применение для создания упрочненных поверхностей изделий, путем формирования модифицированных упрочняющих покрытий [11-13]. Применение импульсного разряда высокой энергии между вибрирующим электродом и металлической подложкой позволяет инициировать микрометаллургические процессы, что обеспечивает высокую адгезионную прочность между покрытием и подложкой.

Методика эксперимента. В ходе проведенных исследований для формирования покрытий необходимой толщины применяли следующие методы электродуговой наплавки: дуговая наплавка (I), дуговая наплавка с неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа (II), аргонодуговая наплавка с неплавящимся электродом (III). В качестве легирующих материалов применяли электродную проволоку ОЗС-12

для метода (I), проволоку Св-08Г2С для метода (II), проволоку СВ-08А для метода (III). Химический состав применяемых проволок приведены в таблицах 3.1-3.3

Для оценки химического состава формирующихся покрытий на стальной подложке из стали 45 применяли метод рентгеновской флуоресцентной спектроскопии. Исследования проведены на приборе МАКС-G. Наплавленные образцы подвергались предварительной обработке путем шлифования до 9-10 класса чистоты.

Результаты исследований. Результаты исследований по определению химического состава наплавленных покрытий приведены на рис. 1.

Таблица 1. – Химический состав электродной проволоки ОЗС-12.

C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %
не более 0,12	0,45-0,8	0,1-0,25	0,03	не более 0,025

Таблица 2. – Химический состав электродной проволоки Св-08Г2С.

C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr	Mo	Ni	V	Ti	Al	Cu	N	As
0,05 - 0,11	1,8-2,1	0,7-0,95	<0,025	<0,03	<0,2	<0,15	<0,25	0,05	<0,04	<0,05	<0,25	<0,01	<0,08

Таблица 3. – Химический состав электродной проволоки Св-08А.

C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %	Cr	Ni	Al	Cu
< 0,1	0,35-0,6	<0,03	<0,04	<0,04	<0,15	<0,3	<0,01	<0,25

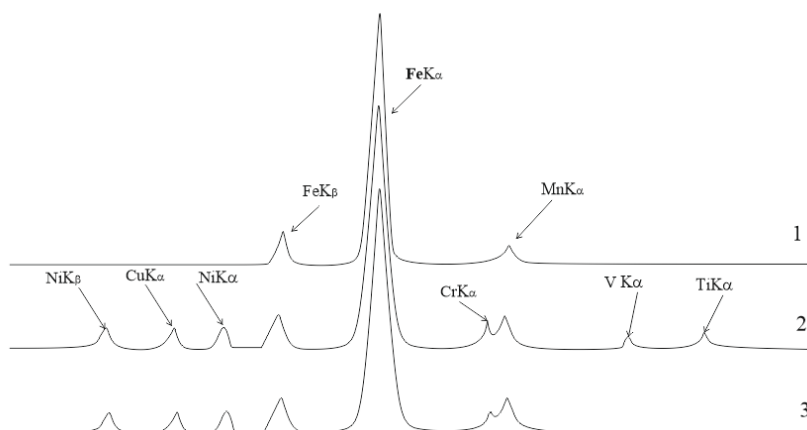


Рисунок 1. Спектры РФА металлических покрытий, сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие, полученное по методу 1; 2 – покрытие, полученное по методу 2; 3 – покрытие, полученное по методу 3.

Согласно полученным данным химический состав осаждаемых покрытий фактически не отличается химического состава электродных проволок, применяемых для формирования защитных слоев. В связи с этим возможно, предположить, что механические характеристики восстановленных металлических поверхностей будут соответствовать свойствам материалов, применяемых для напыления (рис. 2-3). Твердость наплавленных образцов определяли методами Либа (динамическое индентирование) и Бринелля (статическое индентирование). Результаты исследований приведены на рисунках 2-3.

Исходя из представленных данных на рис. 6 - 7 видно, что наблюдается выглаживание исходного рельефа при трении по стали ШХ15 по наплавленным металлам. Наиболее сглаженный рельеф наблюдается у образца полученного по методу II. Обра-

зование сглаженного рельефа объясняет снижение значений коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытий, получаемых по методу II.

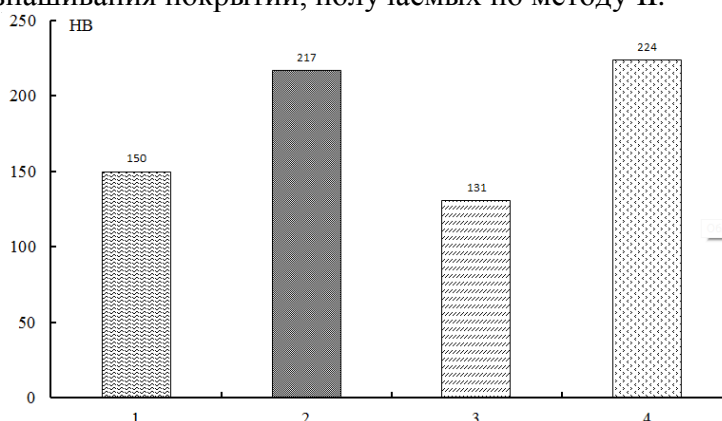


Рисунок 2. Твердость по Бринеллю металлических покрытий сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие полученное по методу 1, 2 - покрытие полученное по методу 2, 3 – покрытие полученное по методу 3, 4- исходная сталь 45.

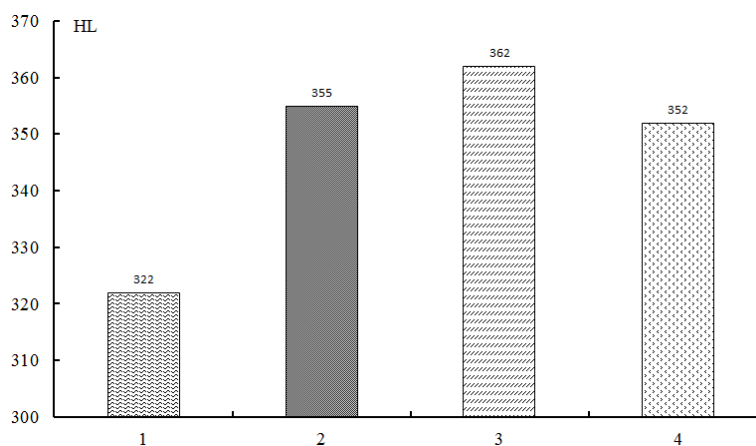


Рисунок 3. Твердость по Либу металлических покрытий сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие, полученное по методу 1, 2 – покрытие, полученное по методу 2, 3 – покрытие, полученное по методу 3, 4 – исходная сталь 45.

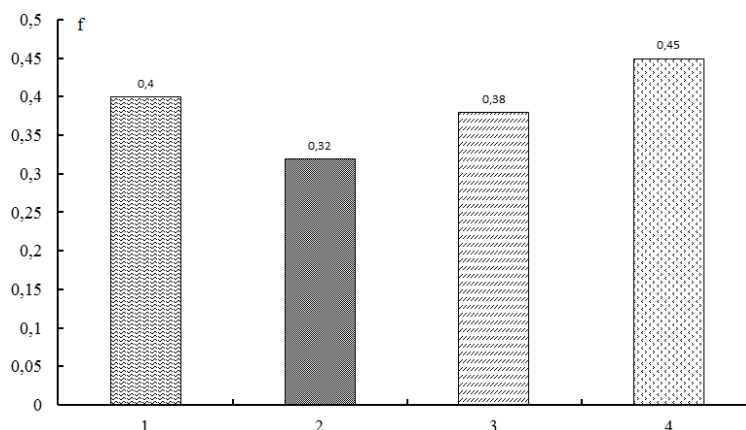


Рисунок 4. Коэффициент трения металлических покрытий сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие полученное по методу 1, 2 – покрытие полученное по методу 2, 3 – покрытие полученное по методу 3, 4 – исходная сталь 45.

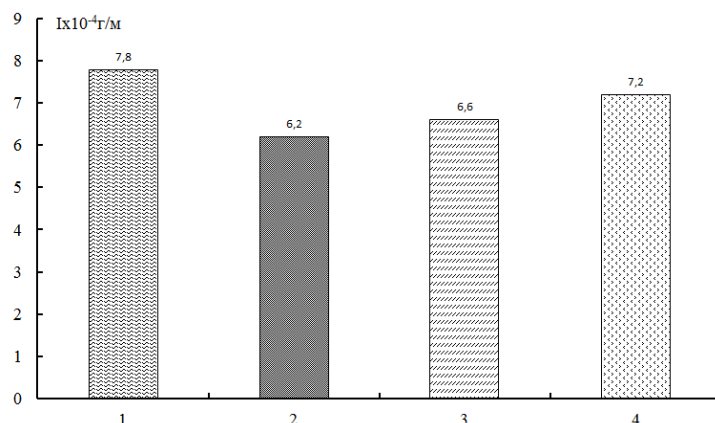


Рисунок 5. Массовая интенсивность изнашивания металлических покрытий сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: 1 – покрытие, полученное по методу 1, 2 – покрытие, полученное по методу 2, 3 – покрытие, полученное по методу 3, 4 – исходная сталь 45.

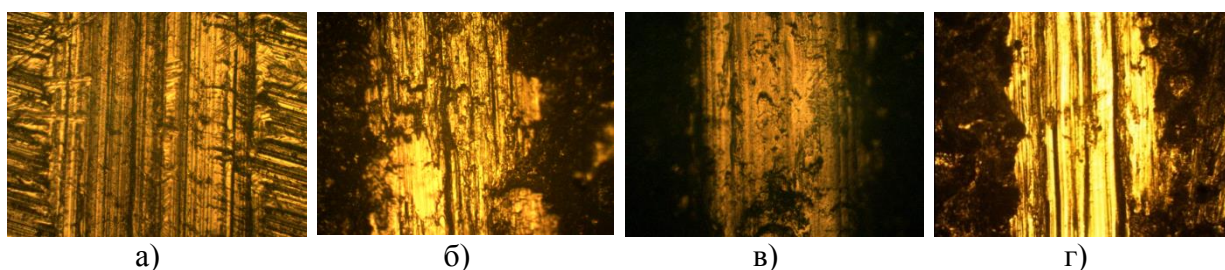


Рисунок 6. Морфология поверхности трения металлических покрытий на сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: а – покрытие полученное по методу 1, б - покрытие полученное по методу 2, в – покрытие полученное по методу 3, г- исходная сталь 45

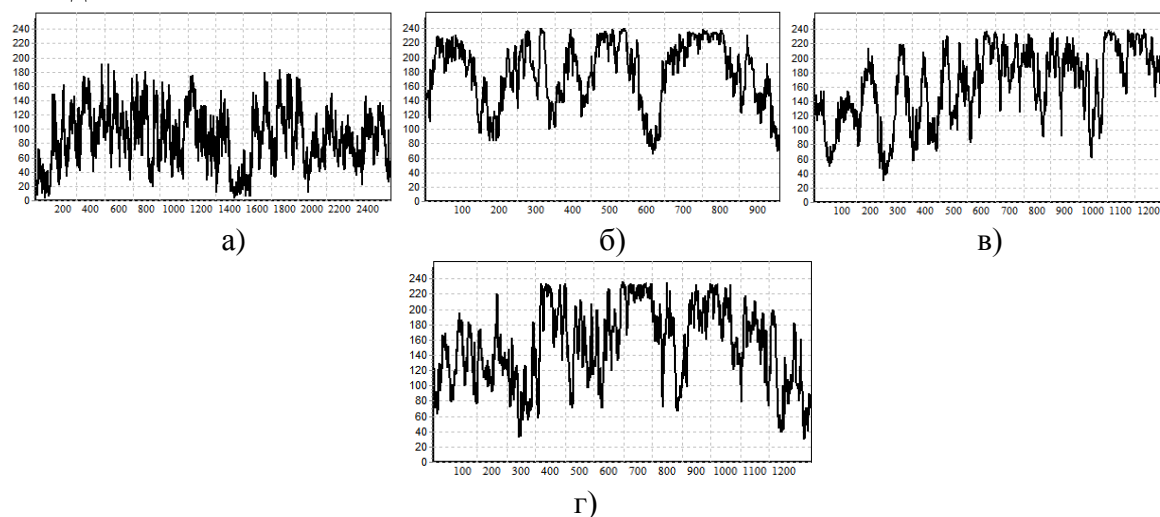


Рисунок 7. Топография поверхности трения металлических покрытий на сформированных на стали 45 методом электродуговой наплавки: а – покрытие полученное по методу 1, б – покрытие полученное по методу 2, в – покрытие полученное по методу 3, г – исходная сталь 45.

Для повышения эксплуатационных характеристик базовых наплавленных материалов применяли метод электроискрового легирования. Использовался метод послойного формирования защитных покрытий, что существенно удешевляет процесс формирования защитных слоев. В таблице 1 приведены составы покрытий.

Таблица 1. – Технологические параметры формирования покрытий ЭИЛ и состав электродов

Образец	Параметры формирования покрытий		
	режим формирования покрытия, Дж	субстрат	состав электрода
№1	0,9	покрытие, полученное по методу 1	Ti+Al+C
№2	3	покрытие, полученное по методу 2	Ti+Al+C
№3	0,9	покрытие, полученное по методу 3	Ti+Si+C
№4	3	исходная сталь 45	Ti+Si+C

Методом рентгеноструктурного анализа изучена структура, сформированных ЭИЛ покрытий.

На рис. 8 – 11 представлены рентгенограммы исследуемых электроискровых покрытий.

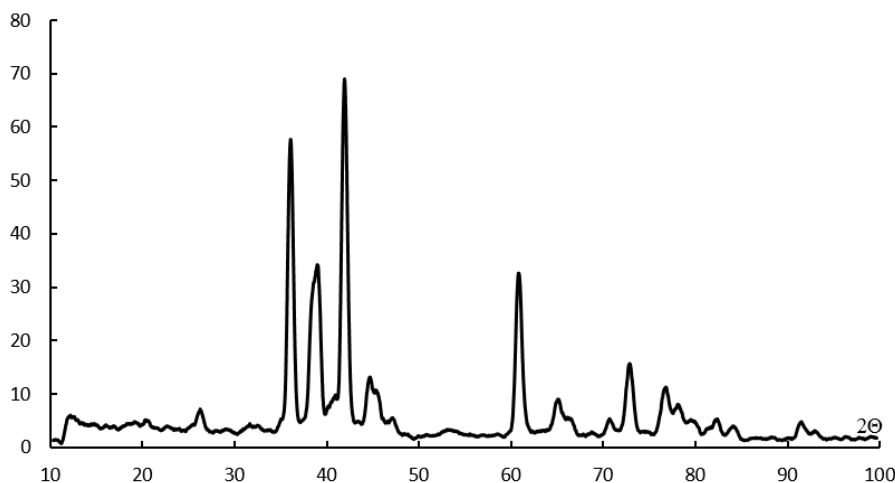


Рисунок 8. Рентгенограмма образца №1 (нумерация согласно данным таблицы 1).

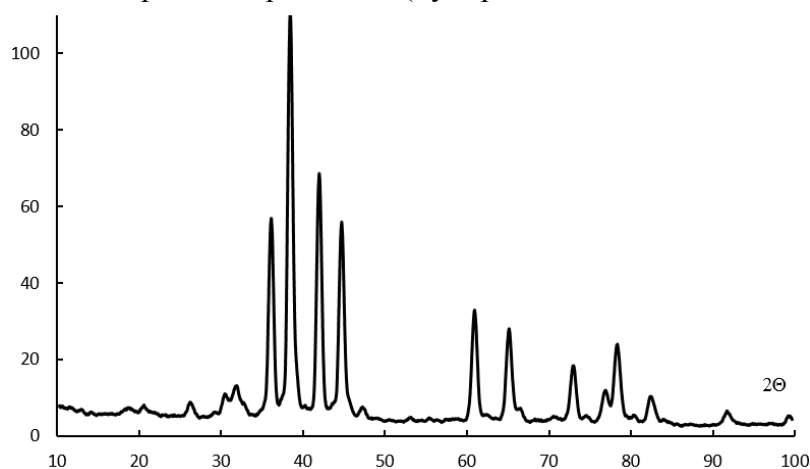


Рисунок 9. Рентгенограмма образца №2 (нумерация согласно данным таблицы 1)

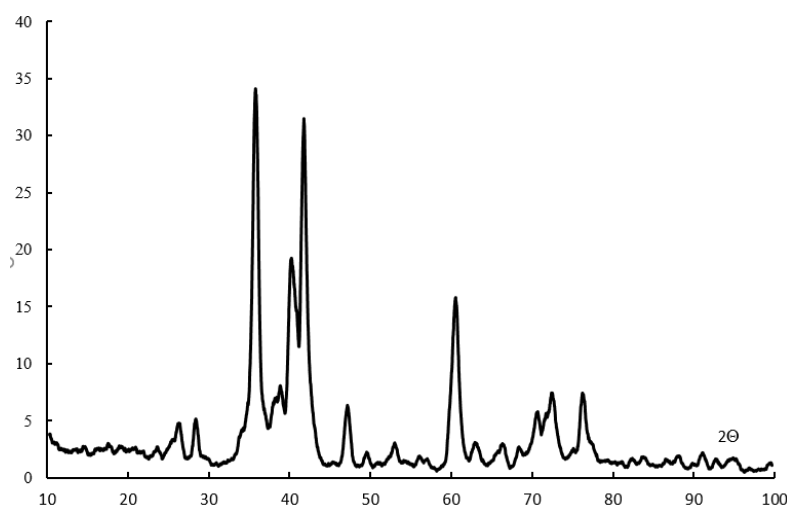


Рисунок 10. Рентгенограмма образца №3 (нумерация согласно данных таблицы 1).

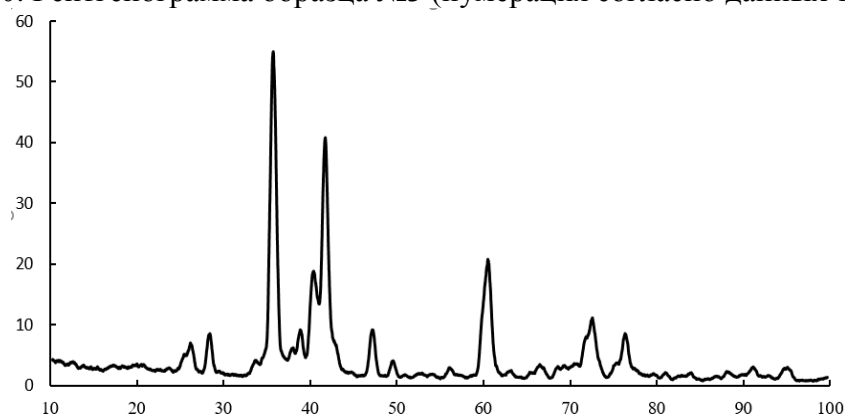


Рисунок 11. Рентгенограмма образца №4 (нумерация согласно данных таблицы 1).

Исходя из полученных данных видно, что в результате электроискрового получения покрытий структура исходных материалов претерпевает существенные изменения. Образуются многокомпонентные покрытия, причем режимы формирования оказывают существенное влияние на структуру получаемых покрытий.

Изучение морфологии электроискровых покрытий методом растровой электронной микроскопии показало наличие нанодисперсных фаз, независимо от режимов и химического состава покрытий (рис. 12)

Изменения в структуре, морфологии покрытий должны отражаться на физико-механических характеристиках покрытий. Проведенный анализ механических свойств электроискровых слоев, сформированных на титановом субстрате ВТ6 подтвердил данные предположения. Микротвердость исследуемых ЭИЛ покрытий в 1,5 – 3 раза выше, чем у электродуговых покрытий, используемых в качестве субстратов.

Таким образом, показано, что условия формирования электроискровых покрытий оказывает существенное влияние на структуру получаемых защитных слоев. Структура покрытий также существенно зависит от химического состава электродов. Наблюдается возможность формирования МАХ-фаз в исследуемых покрытиях. Установлено изменение зависимости значений удельной поверхностной энергии от состава покрытия и технологических режимов формирования.

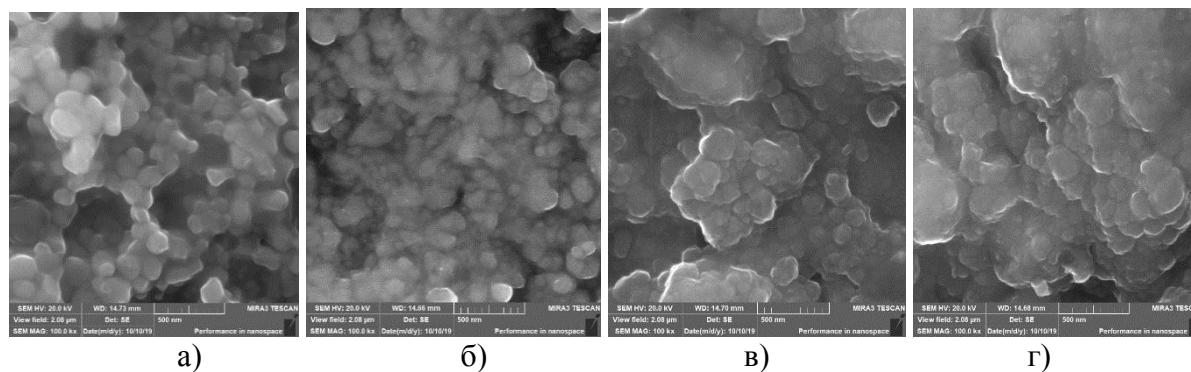


Рисунок 12. Морфология электроискровых покрытий. а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4. Снимки получены методом растровой электронной микроскопии.

Для всех исследуемых типов покрытий наблюдается образование нанодисперсных систем в структуре покрытия. Изменения в структуре, физических параметрах получаемых покрытий положительно сказывается на прочностных характеристиках, что выражается в увеличении значений микротвердости изучаемых покрытий в 1,5 – 3 раза.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, В. В. . Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Ч. I. Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износ- и жаростойкость / Михайлов В.В. [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2013. – Т.49. - №5 – С. 21-44.
2. Михайлов, В. В. Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов / В. В. Михайлов, А. П. Абрамчук // Электронная обработка материалов. – 1986. – № 2. – С. 36-41.
3. Овчинников, Е. В. Структурные особенности нанокomпозиционных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования / Овчинников Е. В. [и др.] // Горная механика и машиностроение. - 2020. - № 1. - С. 93-100.
4. Wang, R. J., Qian Y.Y., Liu J. Structural and interfacial analysis of WC92–Co8 coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition / Wang, R. J., Qian Y.Y., Liu J. // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228 (1). – p. 405 – 409.
5. Tang, C.B. [et al.] Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications / Tang, C.B. // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257 (15). – p. 6364 – 6371.
6. Electric Spark Alloying of Metal Surfaces / A.E. Gitlevich [et al.]. – Kishinev: Stiintsa, 1985. – 196 p.
7. Gitlevich, A. E. Electrode processes during electrospark alloying – transformations at the cathode / A. E. Gitlevich, A. I. Mikhailyuk, V. V. Mikhailov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 1995. – № 3. – P. 16-32.

Поступила в редколлегию 07.02.2022 г.